

# 二重ベータ崩壊実験の将来

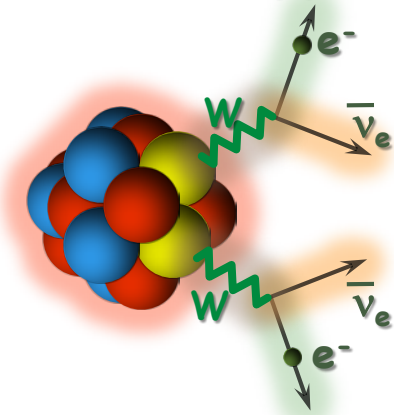
**吉田 齊**  
**大阪大学大学院理学研究科**

**新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」**  
**2017年領域研究会**  
**2017年5月23日 @ 岡山大学**

# 二重ベータ崩壊

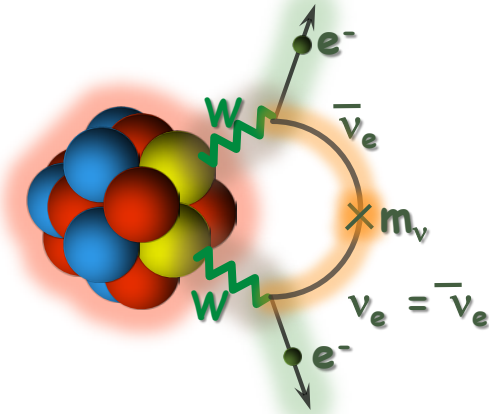
## ● 崩壊モード:

①  $2\nu\beta\beta$  崩壊 :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$



- 標準理論の枠内
- 既に10以上のIsotopeで観測
  - $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ , etc
- 半減期 ;  $10^{18} \sim 10^{21}$  yr

②  $0\nu\beta\beta$  decay :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$



- 標準理論を越えるProcess
  - レプトン数非保存
  - ニュートリノ有限質量
  - マヨラナニュートリノ
- まだ観測されていない!
- 半減期 ;  $T_{1/2} \geq 10^{26}$  yr

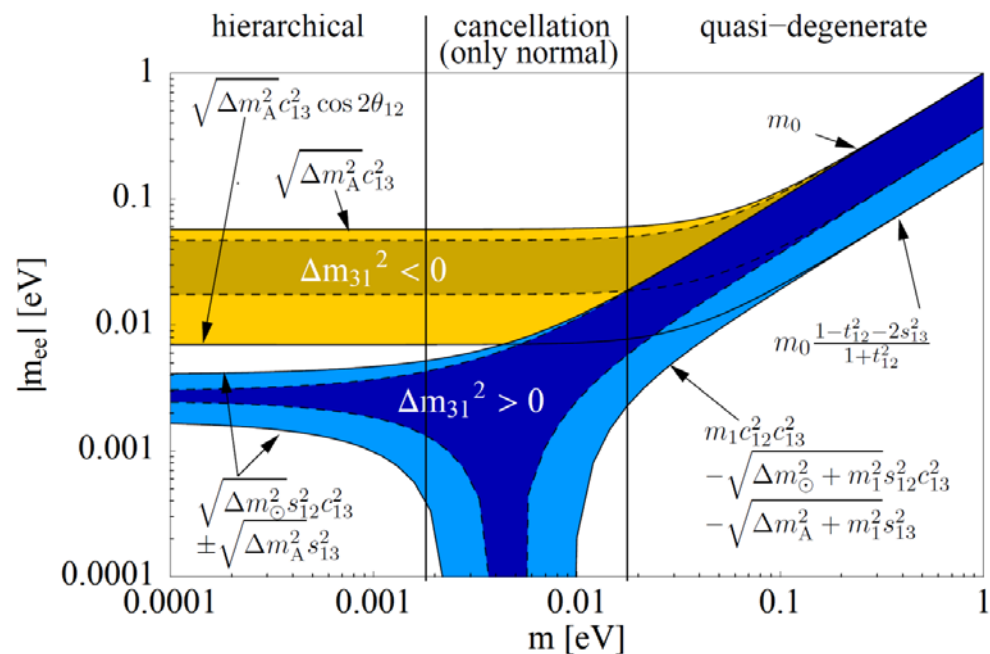
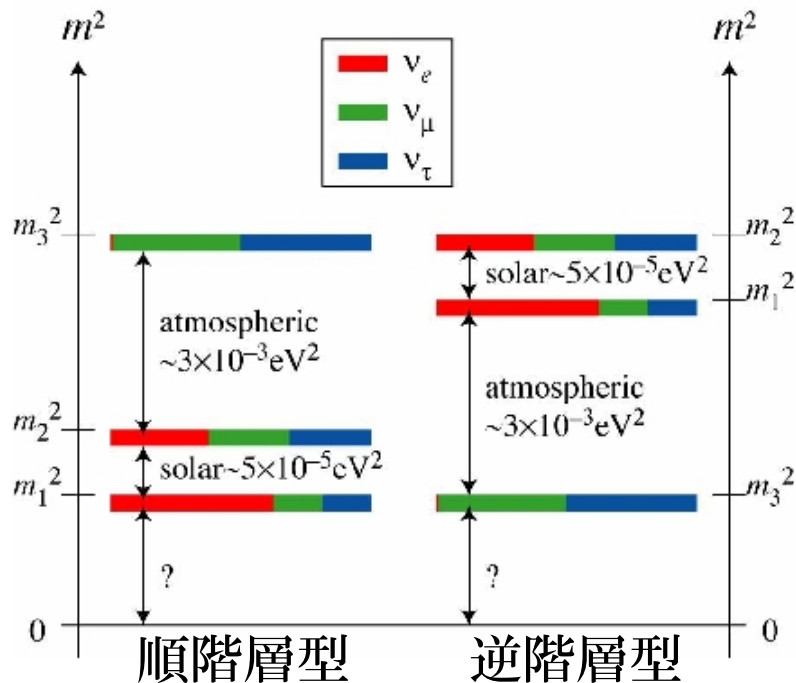
# ニュートリノ振動と $0\nu\beta\beta$ 崩壊

- 有効マヨラナ質量と質量階層性

$$|\langle m_\nu \rangle| = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right| = \left| \cos^2 \theta_{13} (m_1 \cos^2 \theta_{12} + m_2 e^{2i\alpha} \sin^2 \theta_{12}) + m_3 e^{2i\beta} \sin^2 \theta_{13} \right|$$

$$\langle m_{ee} \rangle^{\text{nor}} = \left| m_1 c_{12}^2 c_{13}^2 + \sqrt{m_1^2 + \Delta m_\odot^2} s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\alpha} + \sqrt{m_1^2 + \Delta m_A^2} s_{13}^2 e^{2i\beta} \right|$$

$$\langle m_{ee} \rangle^{\text{inv}} = \left| \sqrt{m_3^2 + \Delta m_A^2} c_{12}^2 c_{13}^2 + \sqrt{m_3^2 + \Delta m_\odot^2 + \Delta m_A^2} s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\alpha} + m_3 s_{13}^2 e^{2i\beta} \right|$$

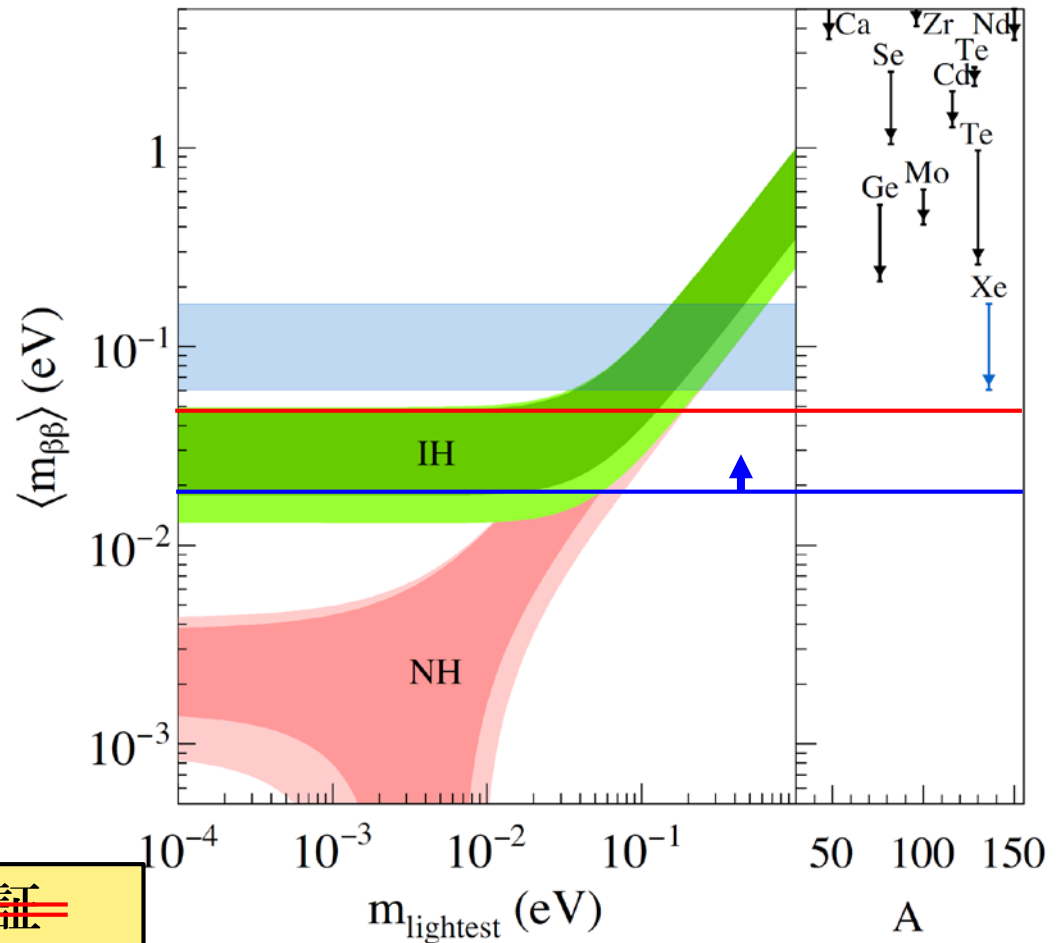
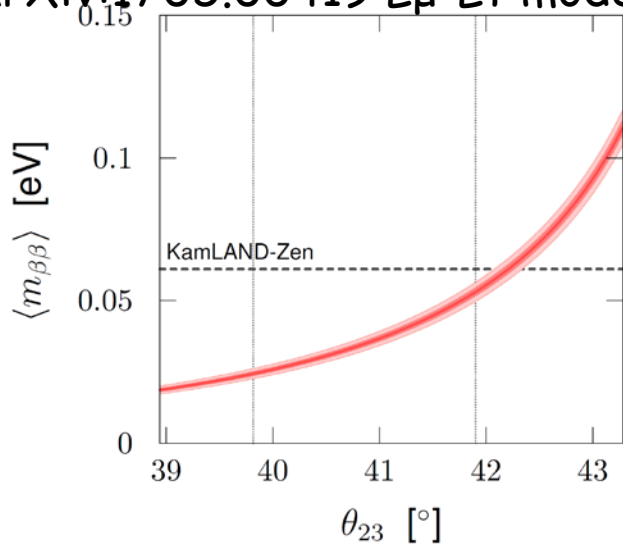


# 有効Majorana質量の予測

- 理論的道標

柳田予測  $\sim 49 \text{ meV}$   
PRD86 013002 (2012)

Asai, Hamaguchi,  $> 17 \text{ meV}$   
arXiv:1705.00419  $L\mu$ - $L\tau$  model



- ~~第1 Step : KKDC Claimの検証~~
- 第2 Step : 逆階層領域での探索
- 第3 Step : 順階層領域へ

# 0νββ実験の感度（核種）

## ● 崩壊核の選択

- → 0νββ 崩壊率を大きく

$$T_{0\nu}^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 \quad (\text{Mass term})$$

検出器側では、感度はBackgroundがあると一般的に

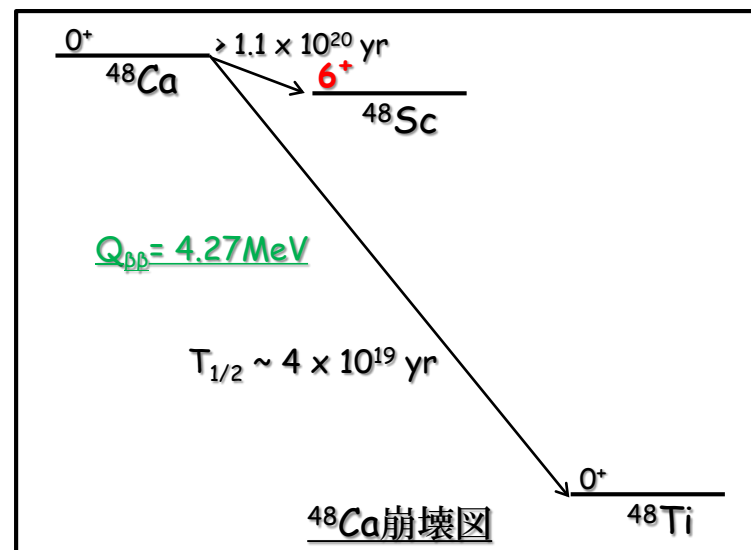
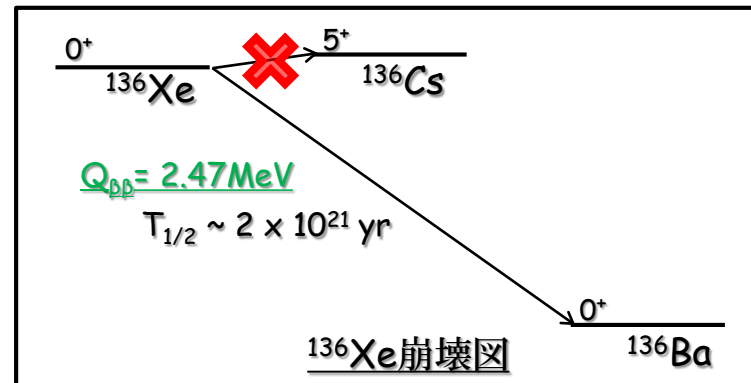
$$\langle m_\nu \rangle \propto T_{0\nu}^{-1/2} \propto (N_{BG} \cdot \Delta E / M \cdot T_{live})^{1/4}$$

- 大容積 ( $M \sim \text{Large}$ )
  - 自然存在比/濃縮
- 低Background ( $N_{BG} \sim \text{Small}$ )
  - Large  $Q_{\beta\beta}$
- 核種の特徴
  - Q値
  - Phase space
  - 自然存在比（もしくは濃縮度）
  - 核行列要素
  - 価格

# 二重ベータ崩壊

- $\beta$ 崩壊がエネルギー的に禁止されている、もしくはスピン遷移則で強く抑制される  $\rightarrow$  二重ベータ崩壊( $\beta\beta$ )崩壊
  - $\beta\beta$ 崩壊核種は多くある
  - TableはQ値の2 MeV以上の核種

| 核種  | Q値 (MeV) | 存在比 (%) |
|---|----------|---------|
| $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$   | 4.271    | 0.187   |
| $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$   | 2.040    | 7.7     |
| $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$   | 2.995    | 9.2     |
| $^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$   | 3.350    | 2.8     |
| $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ | 3.034    | 9.6     |
| $^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$ | 2.802    | 7.5     |
| $^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$ | 2.228    | 5.64    |
| $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ | 2.533    | 34.5    |
| $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ | 2.479    | 8.9     |
| $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ | 3.367    | 5.6     |



# β核種の選択

## ● Phase Space Factor

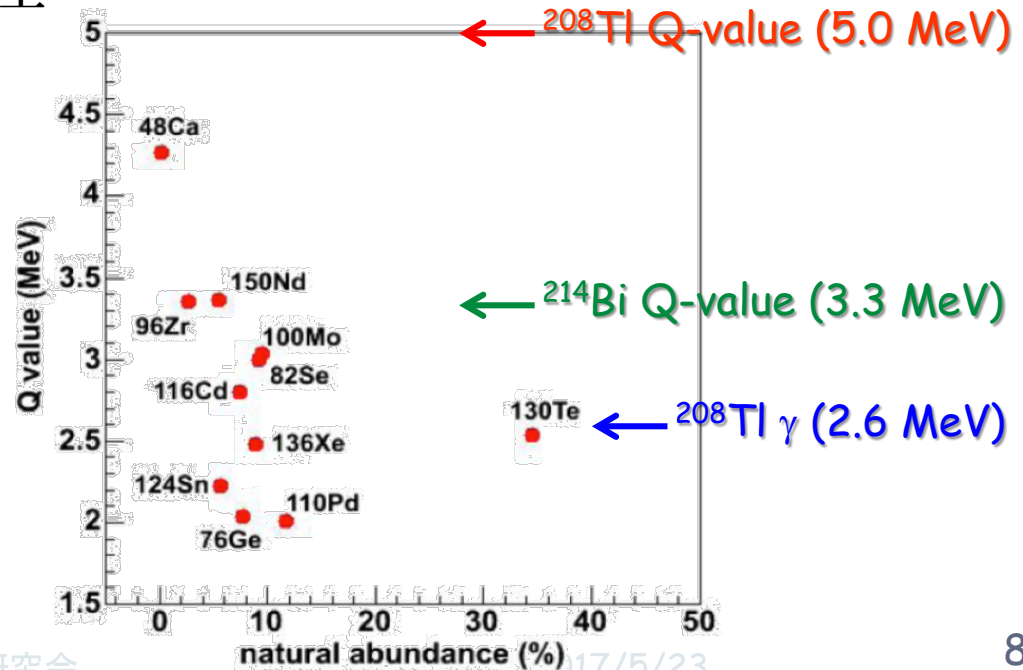
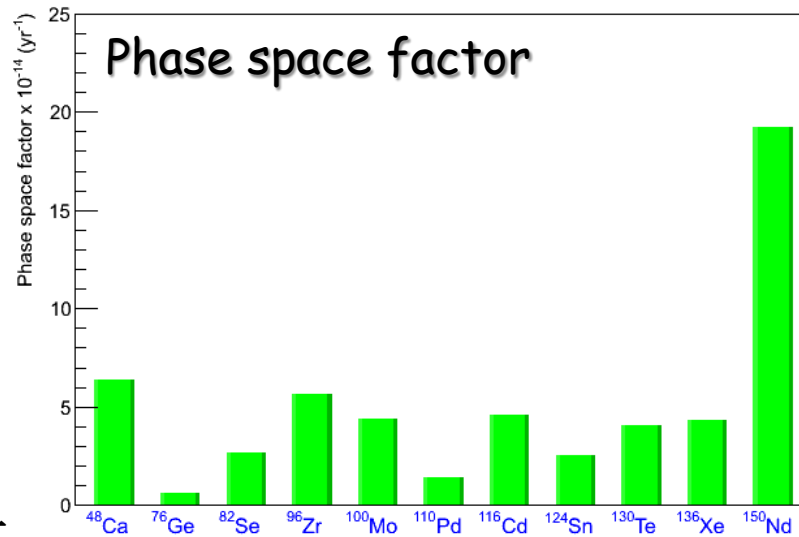
- Q値、原子核半径
- $^{150}\text{Nd}$  ~ Large

## ● Q値

- 自然界のBackground源
- 2.6, 3.3MeVとの差
- $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  3.3MeV以上

## ● 自然存在比/濃縮

- 濃縮の可否、難易度
- $^{130}\text{Te}$  ; ~ 34%
- $^{136}\text{Xe}$  ; 濃縮容易
- $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{116}\text{Cd}$  ;  
濃縮OK



# 核行列要素 (NME)

## ● 崩壊核の選択 →

$$T_{0\nu}^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

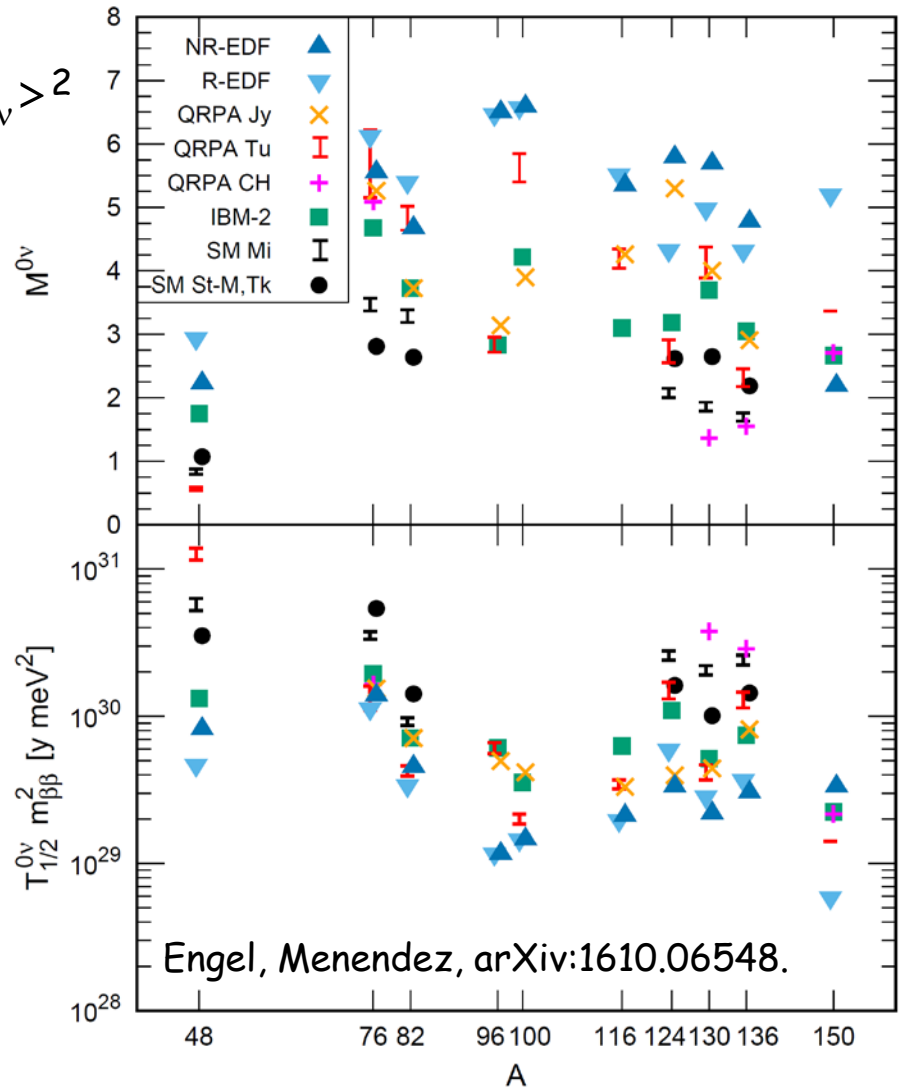
(Mass term)

- 核行列要素を大きく
- 不定性は小さく

## ● 理論的なモデル計算

- 不定性：～ 数倍
  - モデル依存
- 実験的立場から見ると

→ 複数の核種で測定  
することが重要!





# ββ核種の選択（まとめ）

| 核種  | Q値<br>(MeV) | 存在比<br>(%) | Cost ※<br>(M\$/ton) | $T_{1/2}^{0\nu}$<br>( $\times 10^{25}$ yr) | 実験計画  |
|---|-------------|------------|---------------------|--|---|
| $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$   | 4.271       | 0.187      | 1000 <              | 0.0058 (CANDLES)                           | CANDLES   |
| $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$   | 2.040       | 7.7        | ~ 80                | 2.1 (GERDA)                                | GERDA, Majorana                                   |
| $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$   | 2.995       | 9.2        | ~ 120               | 0.036 (NEMO-3)                             | Super-NEMO  |
| $^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$   | 3.350       | 2.8        |                     |  | ZICOS   |
| $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ | 3.034       | 9.6        | ~ 80                | 0.11 (NEMO-3)                              | AMoRE   |
| $^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$ | 2.802       | 7.5        | ~ 180               | 0.017 (Solotovia)                          | COBRA,  |
| $^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$ | 2.228       | 5.64       | ~ 300               |  |   |
| $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ | 2.533       | 34.5       | 20                  | 0.40 (CUORE-0)                             | CUORE → CUPID, SNO+                               |
| $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ | 2.479       | 8.9        | 5 ~ 10              | 11 (KamLAND-Zen)                           | KamLAND-Zen, EXO(nEXO),<br>NEXT, PANDAX-III, AXEL |
| $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ | 3.367       | 5.6        | 300 <               | 0.0018 (NEMO)                              | DCBA(MTD)   |

※ A. Barabash, J of Phys. G: Nucl. Part. Phys. 39 085103 (2012) 参照

# 0νββ崩壊実験の感度（検出器）

- 崩壊核の選択 → 0νββ 崩壊率を大きく

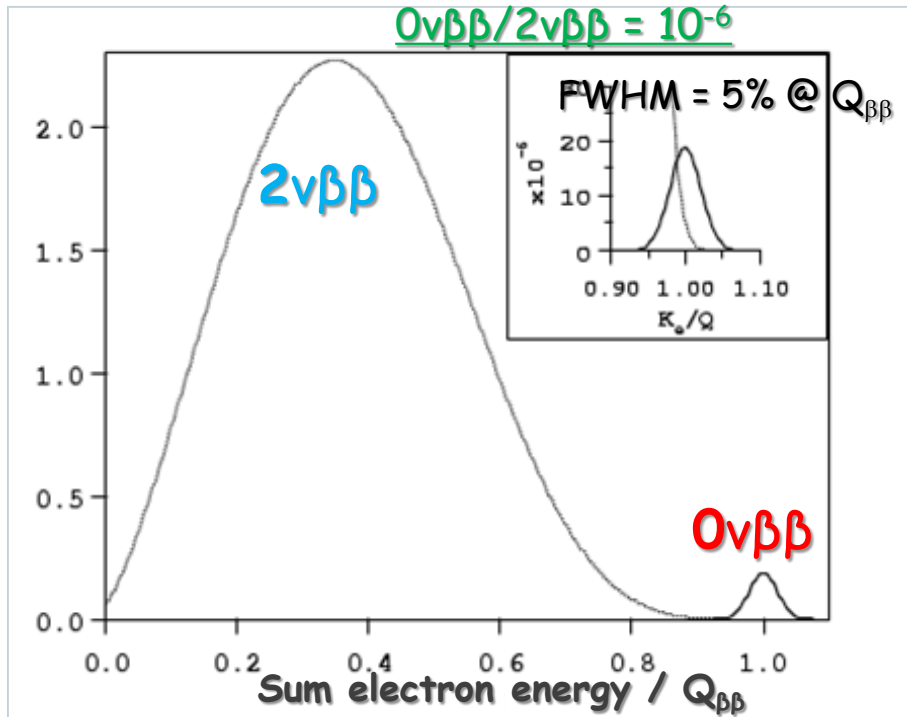
$$T_{0\nu}^{-1} = G_{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2 \quad (\text{Mass term})$$

検出器側では、感度はBackgroundがあると一般的に

$$\langle m_\nu \rangle \propto T_{0\nu}^{-1/2} \propto (N_{BG} \cdot \Delta E / M \cdot T_{\text{live}})^{1/4}$$

- 大容積 (M ~ Large)
  - 自然存在比/濃縮
- 低Background ( $N_{BG} \sim \text{Small}$ )
  - 高純度材料 → 検出器、遮蔽、地下実験室
  - Large  $Q_{\beta\beta}$
  - 2νββ の影響に関しては
    - エネルギー分解能 ( $\Delta E$ ; Good)、小さい2νββ崩壊率
- その他にも... ( $T_{\text{live}} \sim \text{Long}$ )
  - オペレーション容易

# $0\nu\beta\beta$ 崩壊の検出方法



S.R.Elliot and P.Vogel, Ann. Rev.Nucl.Part.Sci.52(2002)115.

- $2\nu\beta\beta$  decay:
  - $Q_{\beta\beta}$ 値をEnd pointに連続成分

- $0\nu\beta\beta$  decay :
  - $Q_{\beta\beta}$ 値にピーク

## Calorimetric法

その他にも...

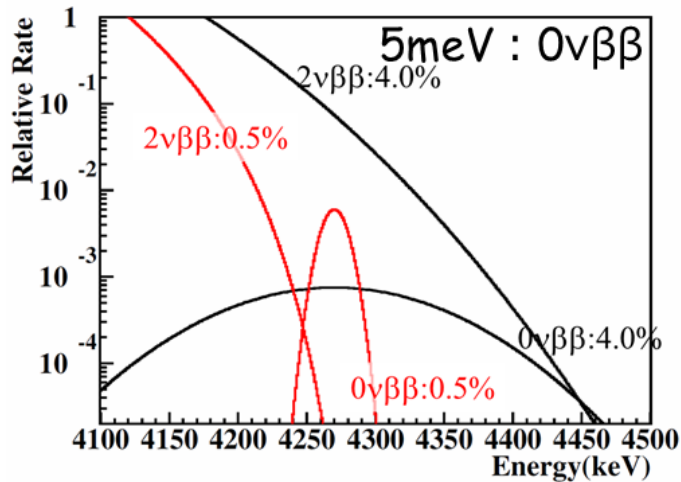
- 2本のElectron ; Tracking
- 娘核種が生成 ; Tagging

- Spectroscopic に $0\nu\beta\beta$ と $2\nu\beta\beta$ を分離
- 他に必要なことは...

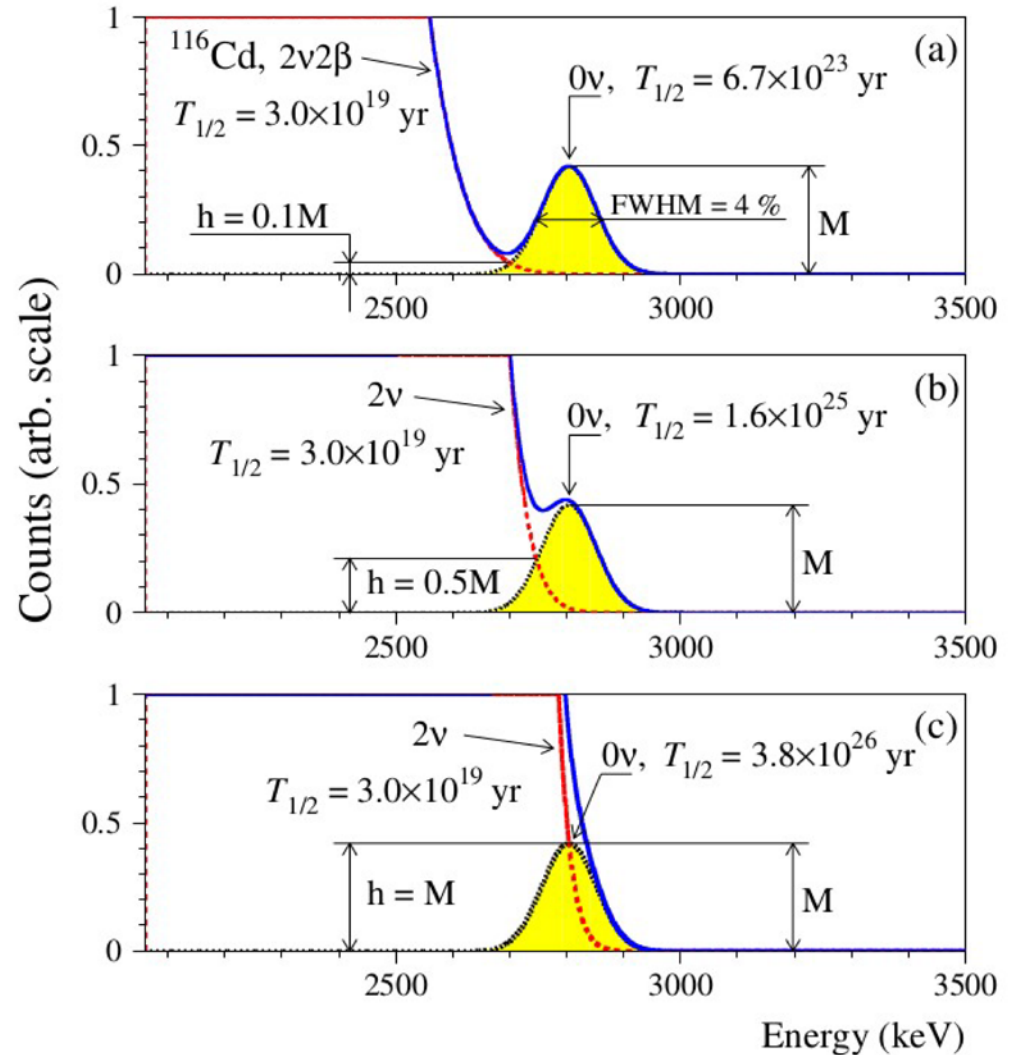
# エネルギー分解能と $0\nu\beta\beta$ のBG

## ● 避けられないBG

- $2\nu\beta\beta$ のTail部分
- エネルギー分解能の改善のみ

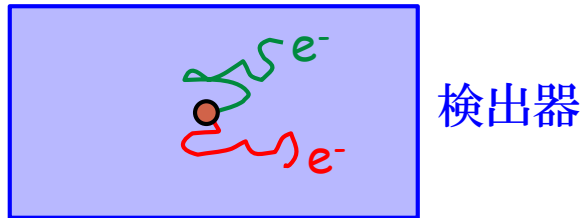


Zdesenko, Danevic, Tretyak  
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004) 971-981

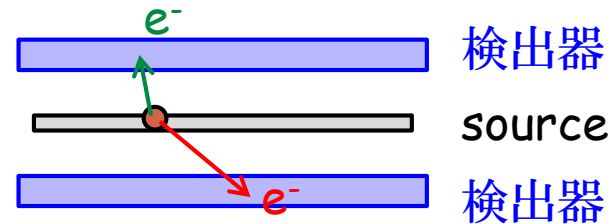


# Types of Detectors

- 検出器技術が多様化 → 大雑把に分類すると



Source  $\equiv$  Detector  
(Calorimetric)

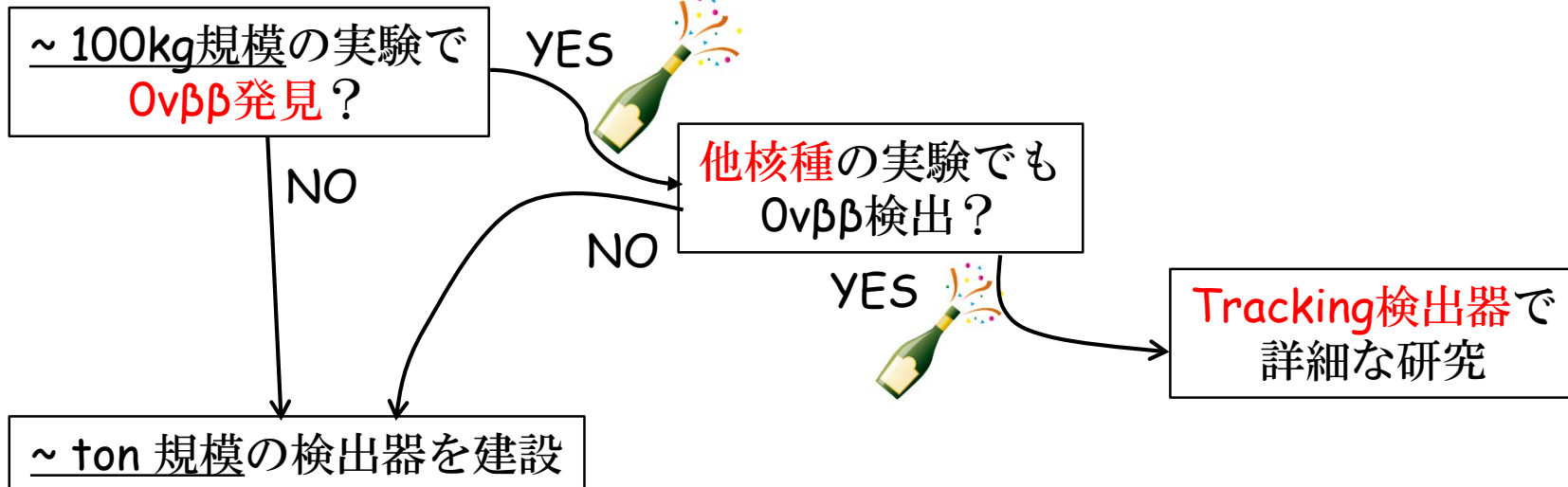


Source  $\neq$  Detector  
(Tracking)

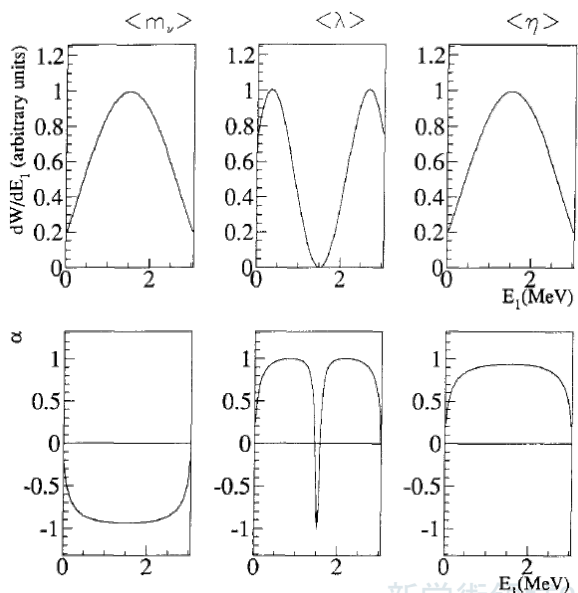
- 利点
  - 大容積  
( $\sim 1$  ton程度までScale up容易)
  - 高検出効率
  - エネルギー分解能が良い
  - Gas/LXeなどは事象解析
- 欠点
  - 検出器になる核種に限られる

- 利点
  - 2本のTrackの同定が可能  
(BG除去能が高い)
  - 同検出器で別の核種が測定可
  - エネルギー・角相関を測定  
→ Mechanism解明
- 欠点
  - 大型化が難しい

# Oνββ発見後の戦略

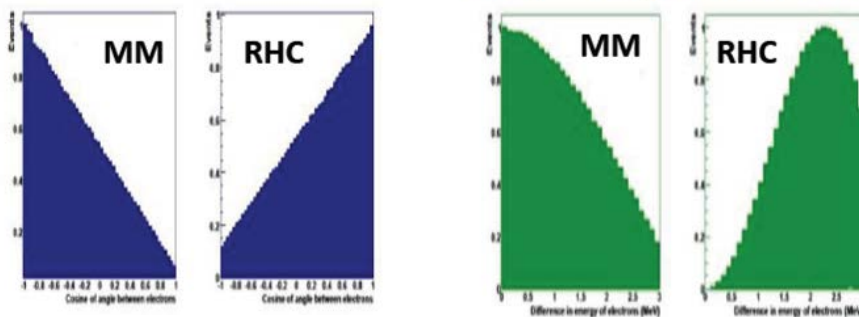


$$[T_{1/2}^{0\nu}(\nu)]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 (\langle m_\nu \rangle^2 + C_{\lambda\lambda} \langle \lambda \rangle^2 + C_{\eta\eta} \langle \eta \rangle^2 + C_{m\lambda} \langle m_\nu \rangle \langle \lambda \rangle + C_{\lambda\eta} \langle \lambda \rangle \langle \eta \rangle + C_{m\eta} \langle m_\nu \rangle \langle \eta \rangle)$$



## 検出されるエネルギー・角度相関

Angular distribution       $E_{e_1} - E_{e_2}$  distribution



# 個々の実験計画

すべて細かく見ていく時間はない

# $0\nu\beta\beta$ 実験の世界情勢@2013年4月

- 「極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会」
  - 二重ベータ崩壊実験の世界情勢 @ 2013年4月23日

## 世界中の実験プロジェクト

### ◆ Source = Detector (Calorimetric)

|              |  |
|--------------|--|
| Ionization   | GERDA ( $^{76}\text{Ge}$ )<br>MAJORANA ( $^{76}\text{Ge}$ )  |
| + Tracking   | COBRA ( $^{116}\text{Cd}$ )  |
| Bolometers   | CUORE ( $^{130}\text{Te}$ )<br>LUCIFER ( $^{82}\text{Se}$ )<br>$\text{ZnMoO}_4$ ( $^{100}\text{Mo}$ )<br>AMoRE ( $^{100}\text{Mo}$ ) |
| Scintillator | KamLAND-Zen ( $^{136}\text{Xe}$ )<br>SNO+ ( $^{150}\text{Nd}$ )<br>CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )                                      |
| Liquid Xe    | XMASS ( $^{136}\text{Xe}$ )  |
| + Tracking   | EXO ( $^{136}\text{Xe}$ )  |

### ◆ Source $\neq$ Detector (Tracking)

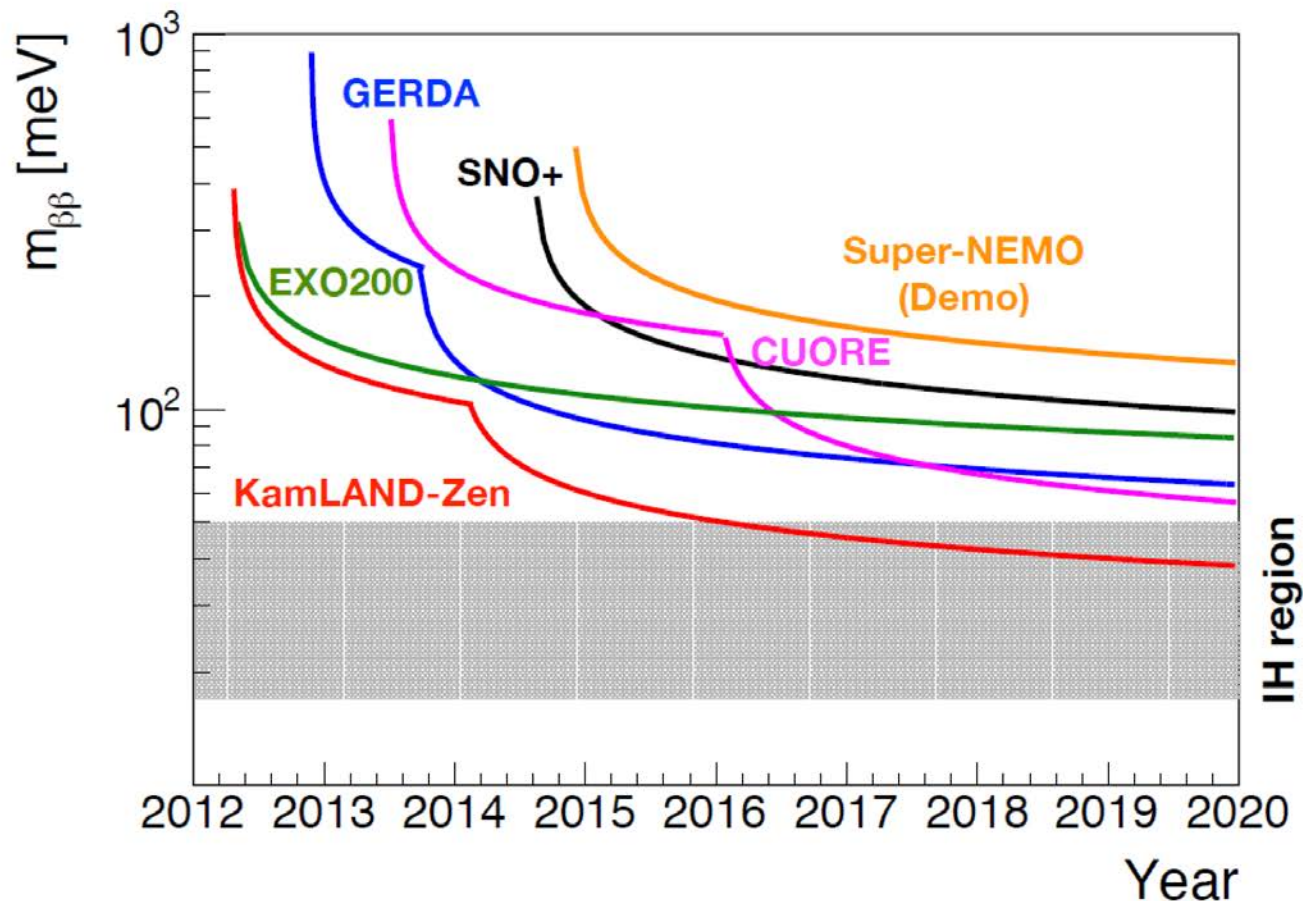
|   |                           |
|---|---------------------------|
| Super-NEMO ( $^{82}\text{Se}$ )<br>MOON ( $^{100}\text{Mo}$ ) | Tracking +<br>Calorimeter |
| DCBA(MTD) ( $^{150}\text{Nd}$ )<br>NEXT ( $^{136}\text{Xe}$ ) | Tracking                  |



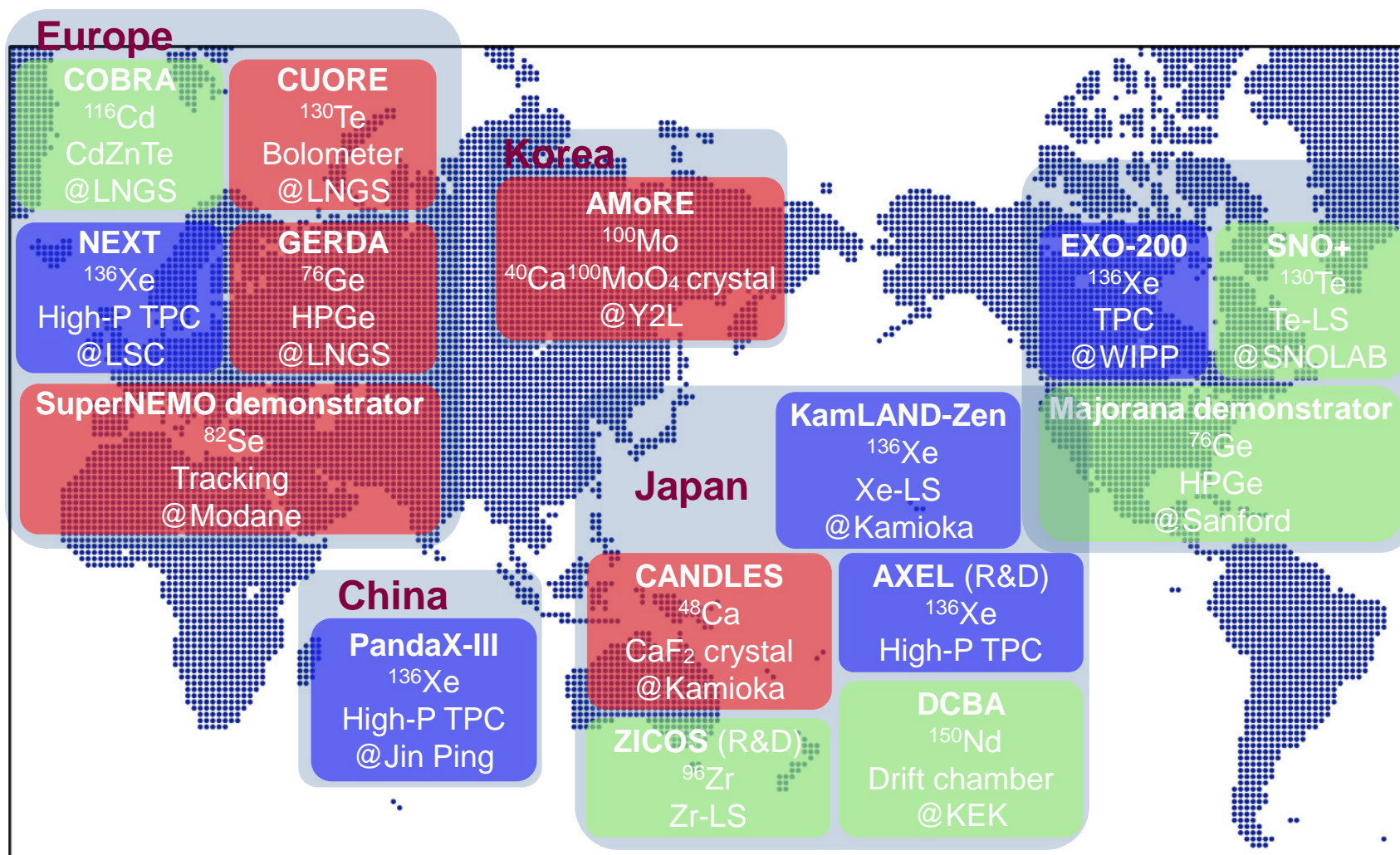
# $0\nu\beta\beta$ 実験の将来@2013年4月

- その時のまとめSlide

## まとめ



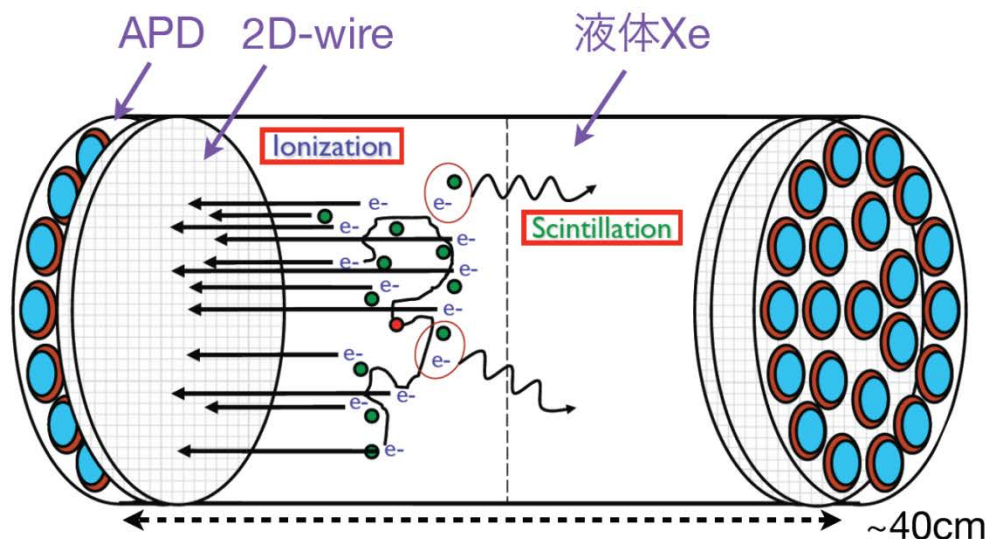
# Experiments using $^{136}\text{Xe}$



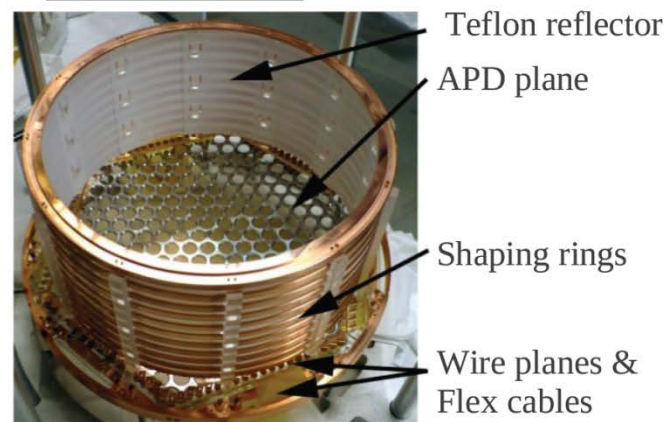
# EXO Experiment

## Liquid Xe TPC

- ターゲット: 175kgの液体Xe (80.6%が $^{136}\text{Xe}$ ,  $Q$ 値 = 2458 keV)
- 検出器: TPC (Time Projection Chamber)  
+ LAAPD (Large Area Avalanche Photodiodes)



検出器の写真

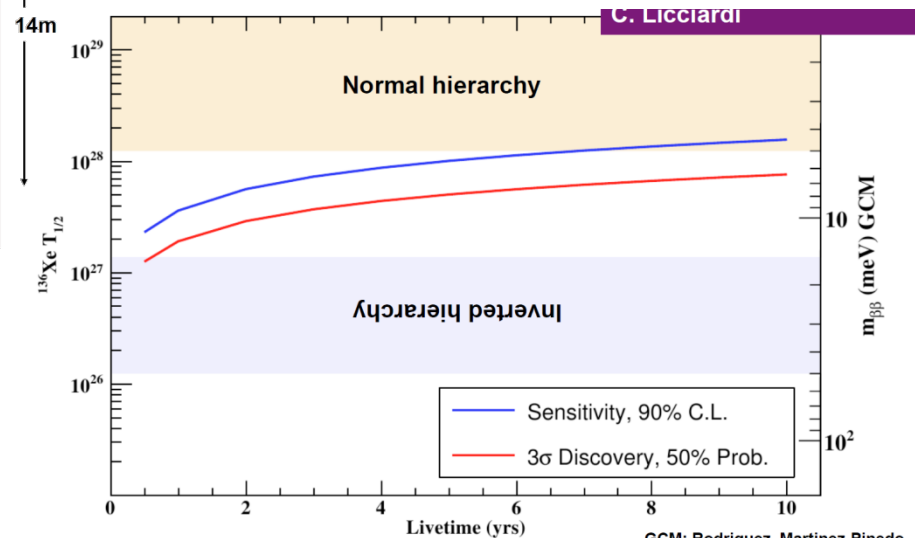
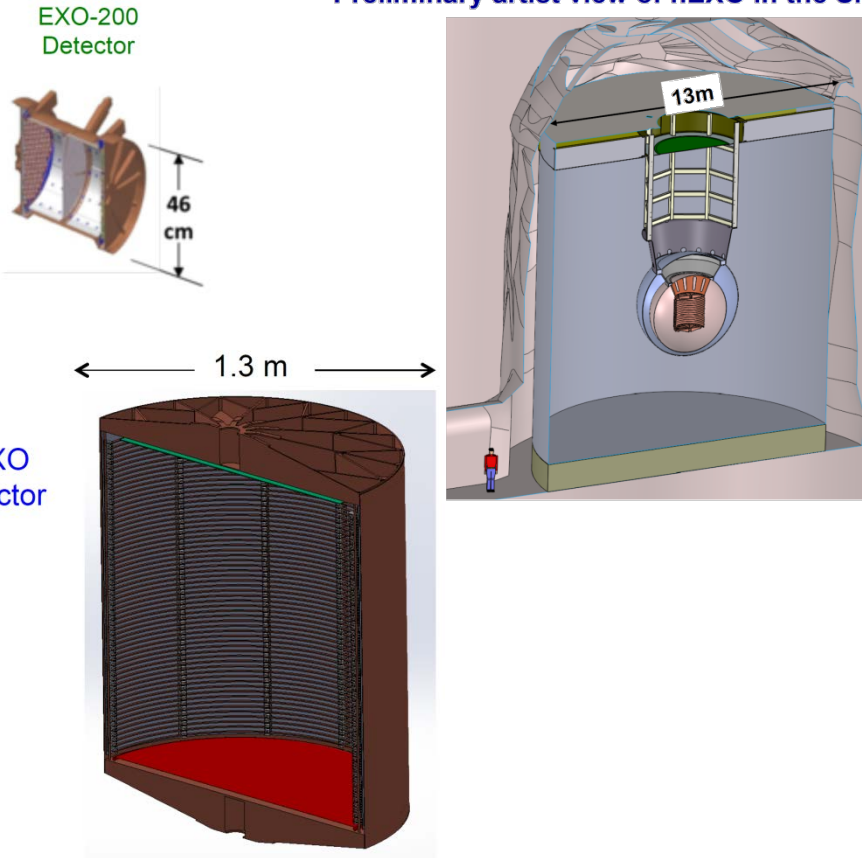


- 検出原理 (2種類の検出器によるSignal / BG区別)
  - Ionizationで生成した $e^-$ を観測 (TPC): → Single / Multi反応を区別
  - シンチレーション光観測 (APD) → Energy測定、 $\alpha$ 粒子の区別

# From EXO-200 to nEXO

- EXO-200 has surpassed design energy resolution and SS/MS rejection capability, and is expected to surpass the design background goals.
- nEXO is a proposed  $\sim 5$  tonne detector.
- 4.7 tons of active  $^{enr.}\text{Xe}$  (90% or higher),  $< 1.0\%$  ( $\sigma/E$ ) energy resolution.
- Its design can reach  $0\nu\beta\beta$  half-life sensitivity of  $\sim 10^{28}$  yrs

Preliminary artist view of nEXO in the SNOlab Cryopit



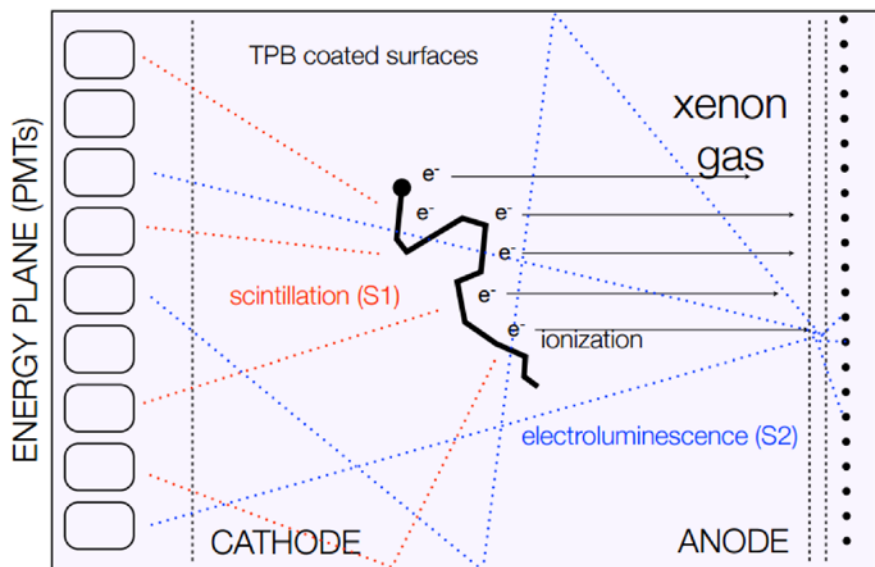
nEXO sensitivity as a function of time for the best-case nuclear matrix element (GCM).

GCM: Rodriguez, Martinez-Pinedo, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252503

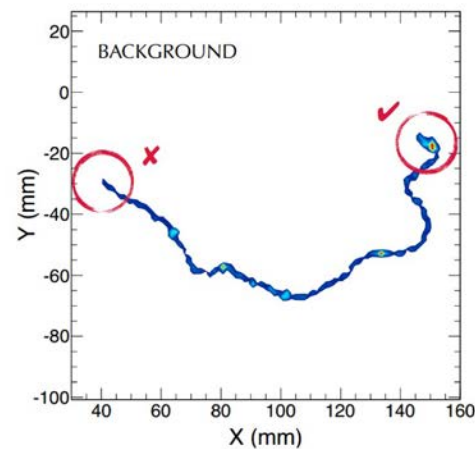
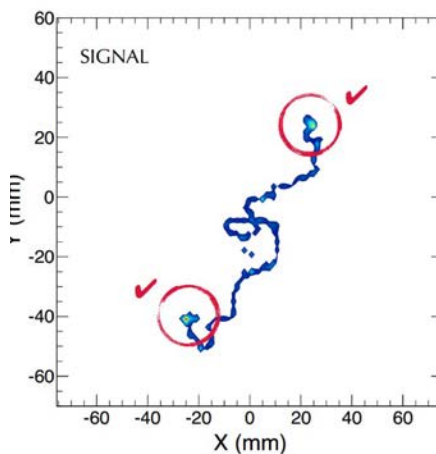
21

# NEXT, PANDAX-III, AXEL Experiment

## High pressure gas-Xe TPC



- 10 ~ 15 barの高圧Xeガス
- Electro-Luminessenceによる高分解能
- Eventトポロジー利用 → 低BG化



### NEXT-100 – to start in 2018

- 100 kg of  $^{136}\text{Xe}$  (91% enrichment)
- resolution at Q: 0.7% FWHM
- Expected bkg:  $4 \cdot 10^{-4}$  cts/(keV·kg·y)

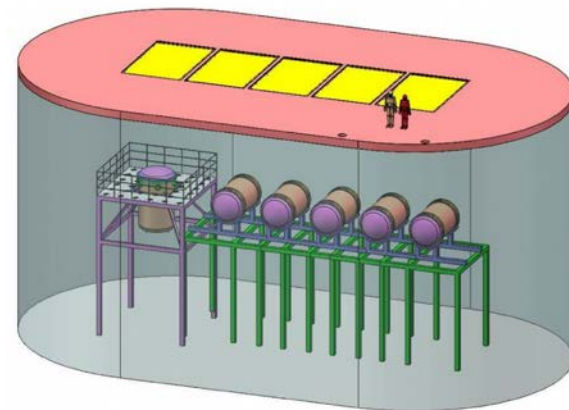
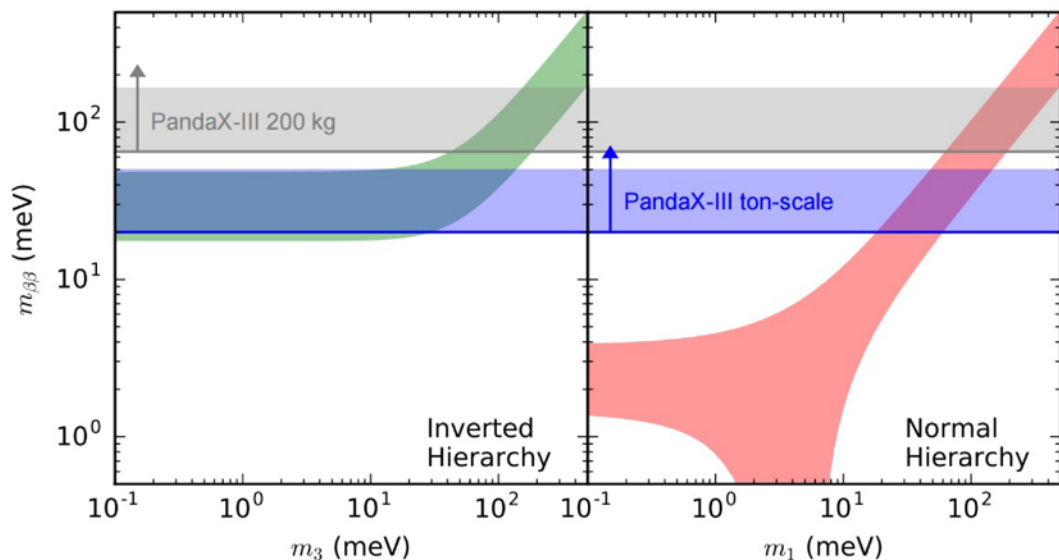
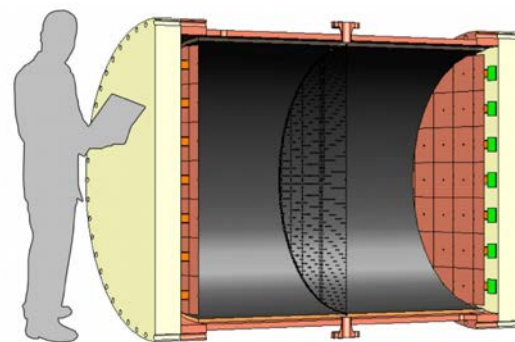
# PANDAX-III

## First stage – 2017

- 200 kg TPC operated at 10bar
- resolution at Q: 3% FWHM
- bkg:  $10^{-4}$  cts/(keV·kg·y) or 1.5 cts/y in ROI
- Expected half-life sensitivity:  $10^{26}$  y ( $m_{\beta\beta} \sim 65 - 165$  meV)

## Second stage – 1 ton foreseen in 2022

- multiple 200 kg modules to reach 1 ton
- resolution at Q: 1% FWHM
- bkg:  $10^{-5}$  cts/(keV·kg·y) or  $\sim 1$  cts/y in ROI
- Expected half-life sensitivity:  $10^{27}$  y ( $m_{\beta\beta} \sim 20 - 50$  meV)

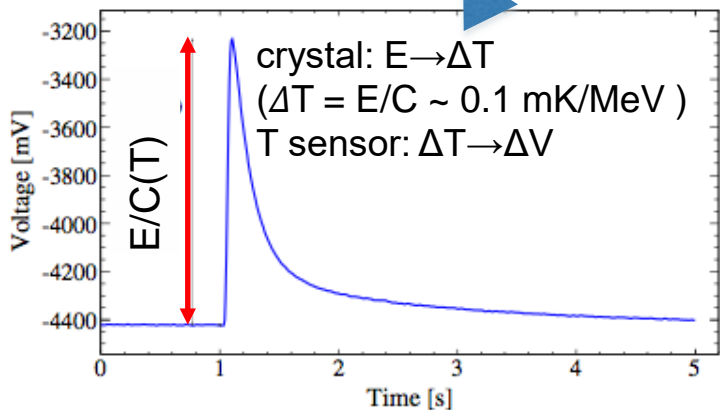
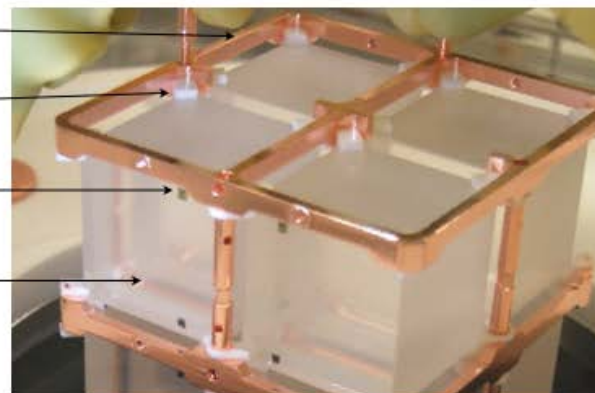
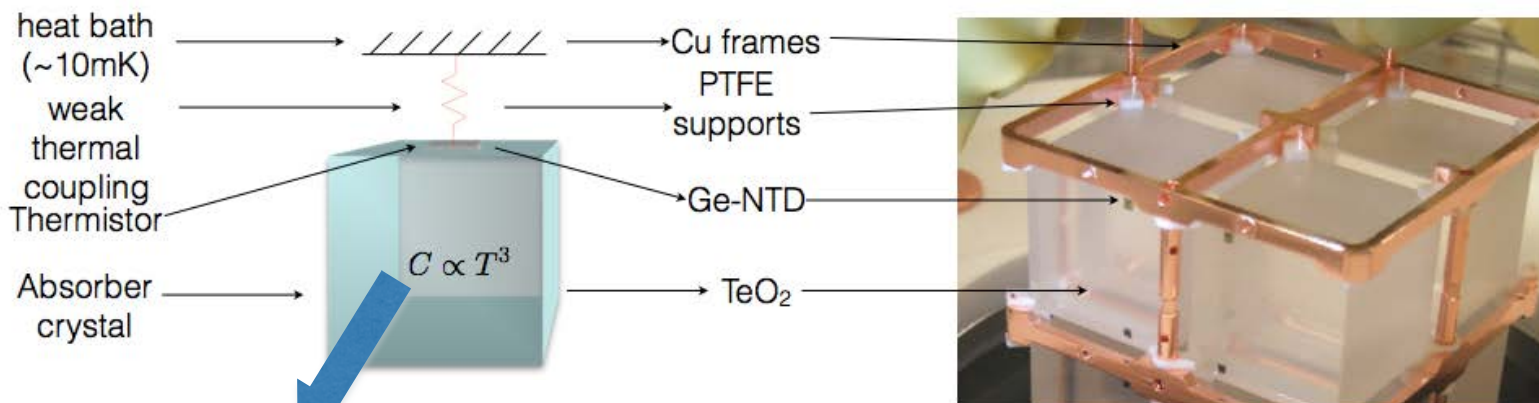


# CUORE実験

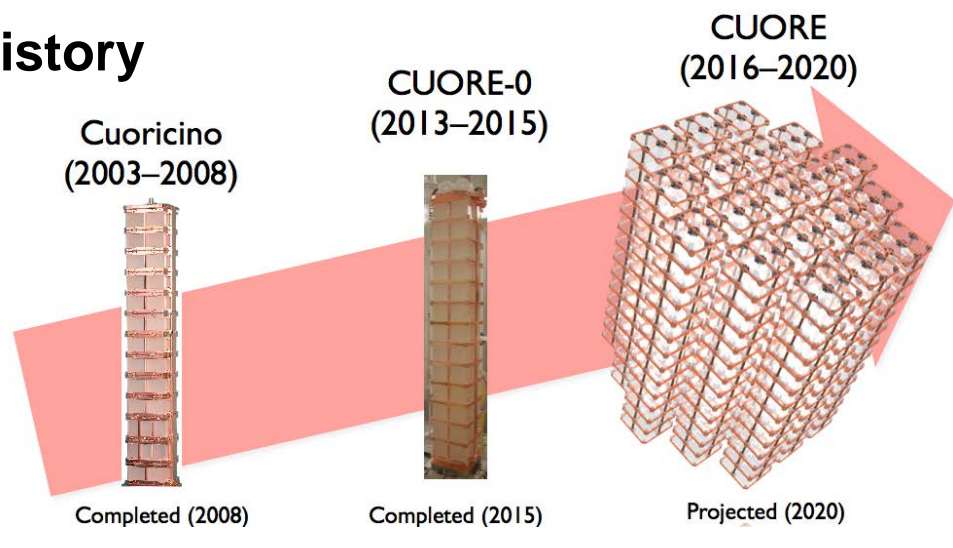
Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

# CUORE Detector

- Located at LNGS (Italy),  $\sim 3600$  m.w.e.
- $\text{TeO}_2$  bolometers (988 crystals in 19 towers), a total mass of  $^{130}\text{Te}$  206 kg
- Operated at  $\sim 10\text{mK}$ . Energy resolution  $\sim 0.2\%$  FWHM



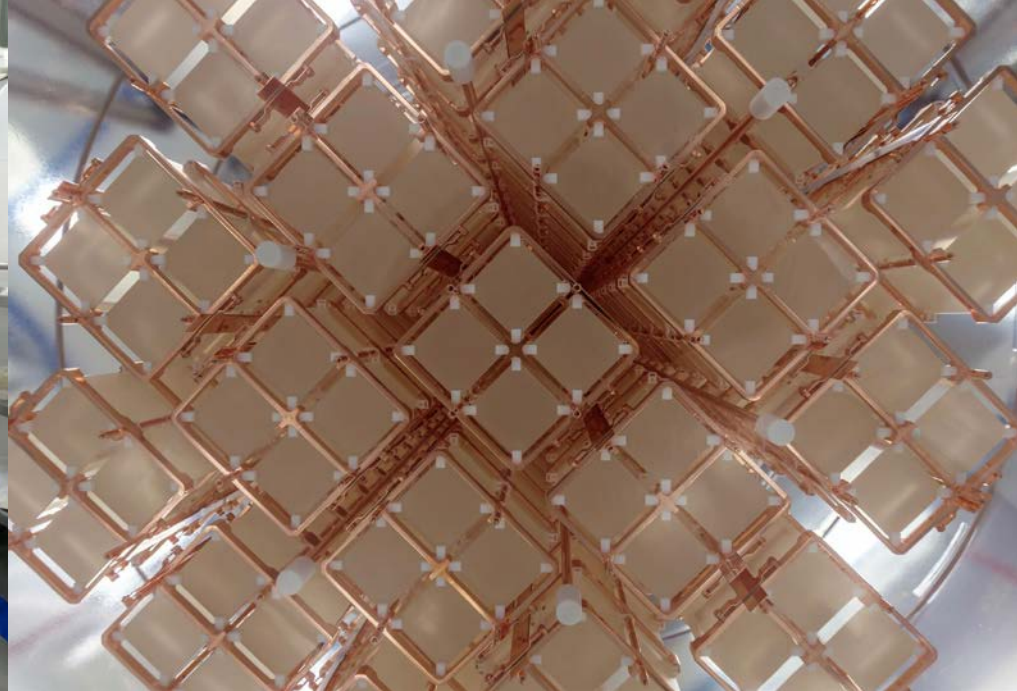
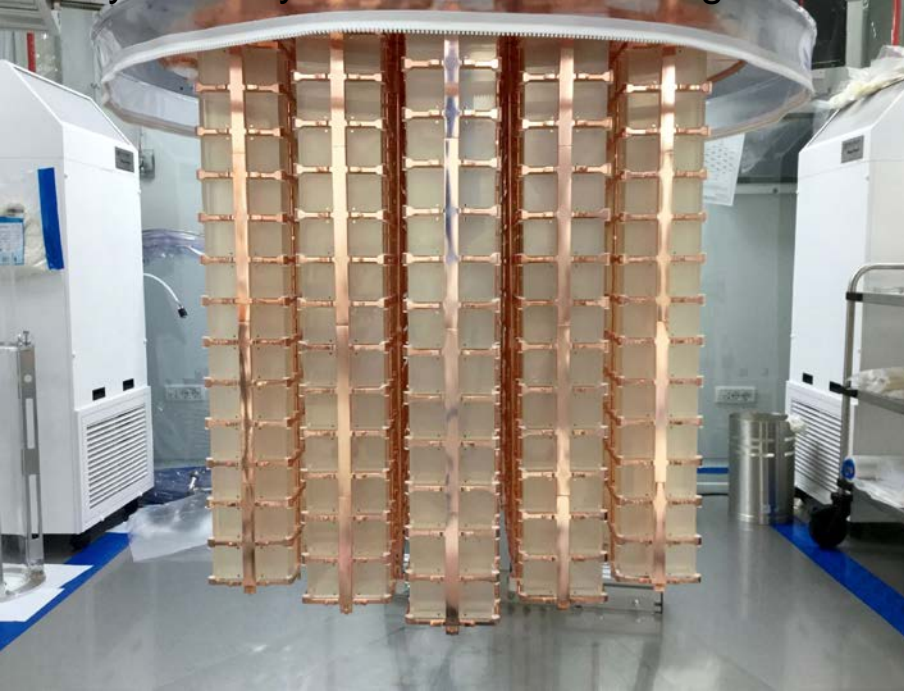
## History





# CUORE tower installation completed!

On August 26, 2016, the CUORE Collaboration reached a major milestone: all 19 towers, consisting of 988 individual  $\text{TeO}_2$  crystals and weighing almost 750 kg (1650 lbs), are now installed in the cryostat! Thanks to the dedicated efforts of specially trained teams of scientists, engineers, and technicians, and logistical support from the entire collaboration, the installation went smoothly over a period of about a month. We are now preparing to close the cryostat and start scientific operations in search for neutrinoless double beta decay, which may hold keys to our understanding of matter abundance in the Universe.



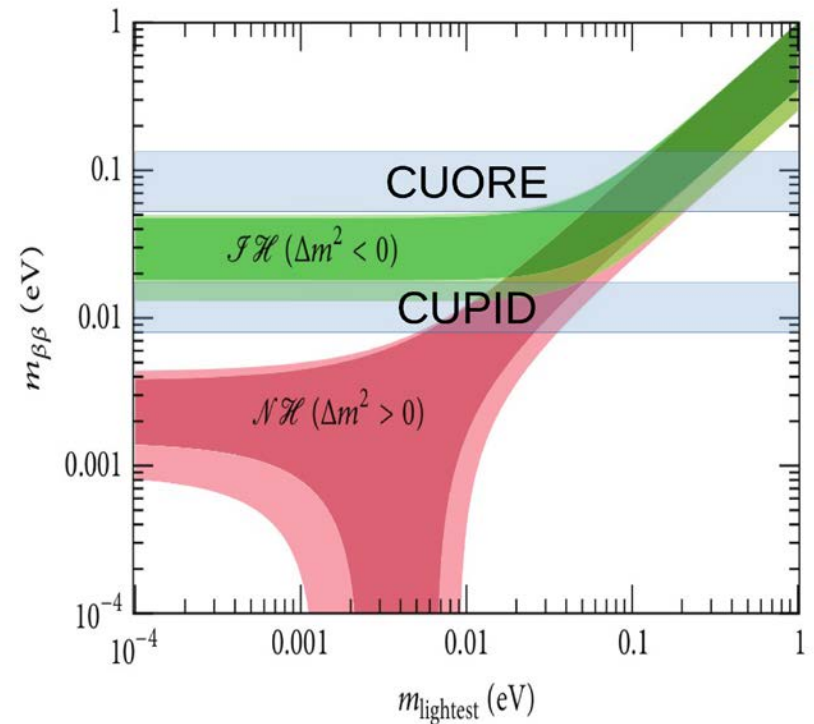
The detectors were installed in a specially constructed cleanroom to protect them from naturally occurring radioactivity, including air filtered to remove radon gas

Bottom view of the towers

**5-year sensitivity:  $T_{1/2}(^{130}\text{Te}) > 9.5 \times 10^{25}$  years,  $m_{\beta\beta} < 50\text{-}130$  meV (90% C.L.)**

# CUORE Upgrade : CUPID

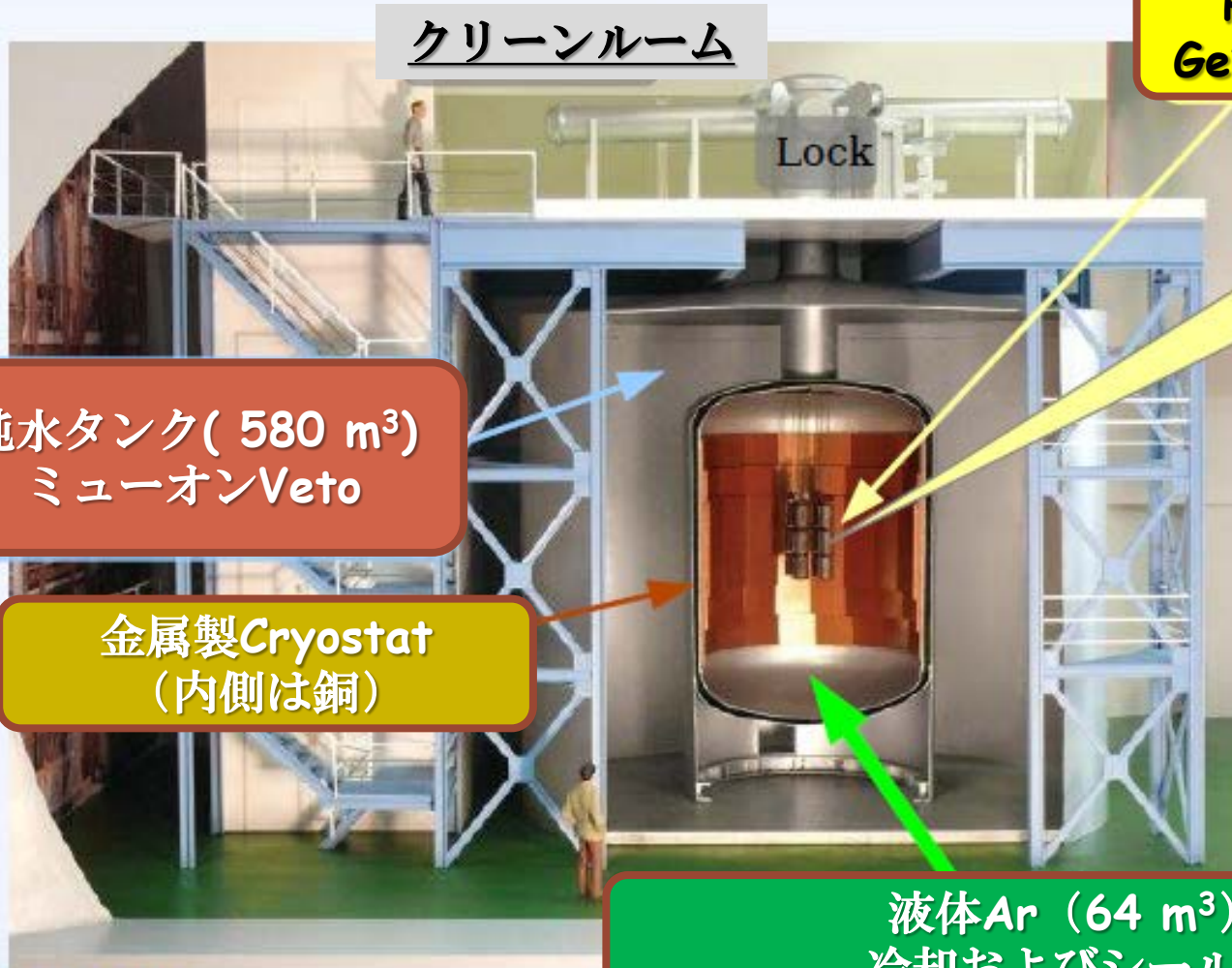
- CUORE検出器を改良
  - Option1: Scintillating-Bolometer ( $\text{Zn}^{82}\text{Se}$  /  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ )
  - Option2:  $\text{TeO}_2$  + Light-detector (PI by Cherenkov photon)
- 現在R&Dの最中
  - 2018年末までにtonスケールの検出器の可否を検証
- CUORE終了後にStart (2023年)
  - 最終感度  $\rightarrow \langle m_{\beta\beta} \rangle = 10\text{--}15 \text{ meV}$



# GERDA実験 / MAJORANA実験

Tonスケールの検出器実現を共同で目指す（努力）

# GERDA実験



arXiv: 1212.4067

- Phase I : 18 kgの<sup>76</sup>Ge検出器 (~86% : HDM/IGEXから)
- Phase II: 新たに20 kgのGe検出器を加える

# GERDA Sensitivity & Schedule

**Phase I:** ● reach sensitivity of  $T_{1/2} = 2 \cdot 10^{25}$  yr at 90% C.L.

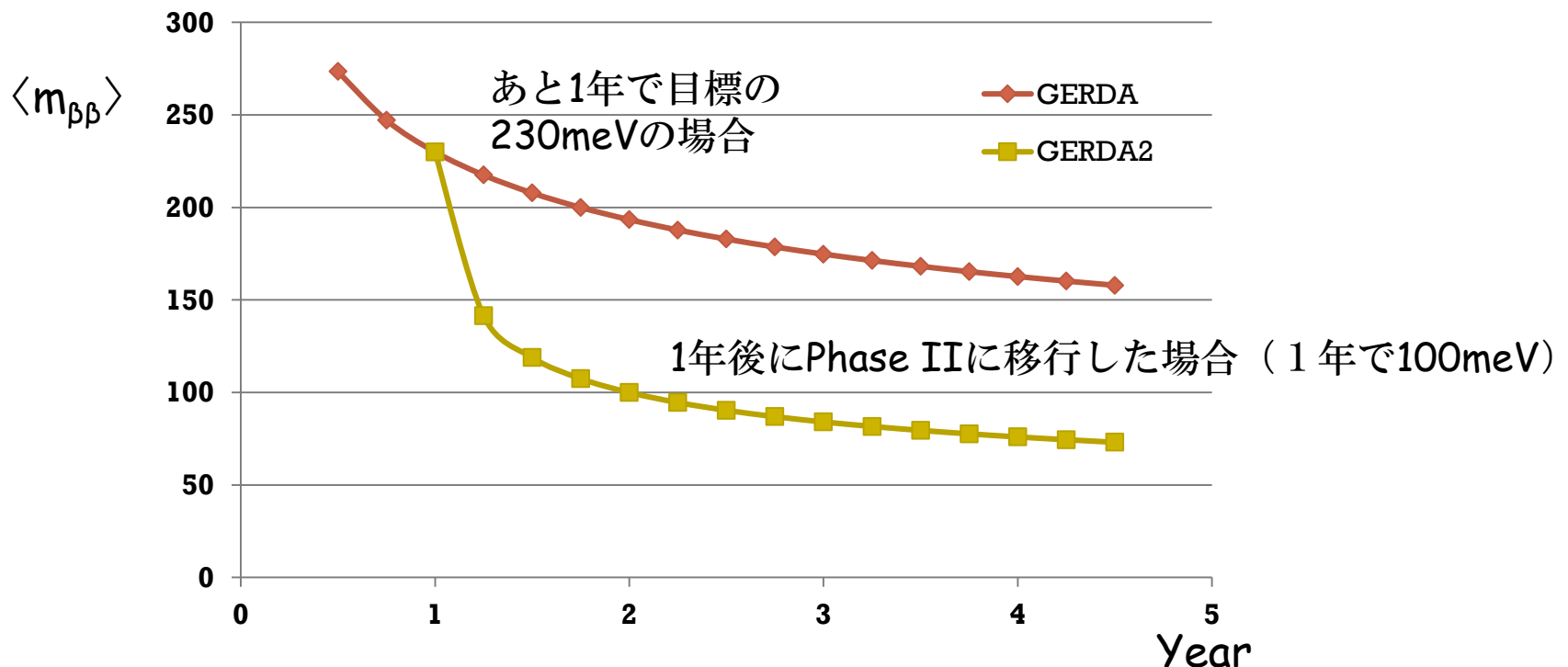
●  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 0.23-0.39$  eV

● → **check claim!**

**Phase II:** ● reach background of  $10^{-3}$  cts/(keV·kg·yr)

● Exposure of 100 kg·yr →  $T_{1/2} > 1.35 \cdot 10^{26}$  yr

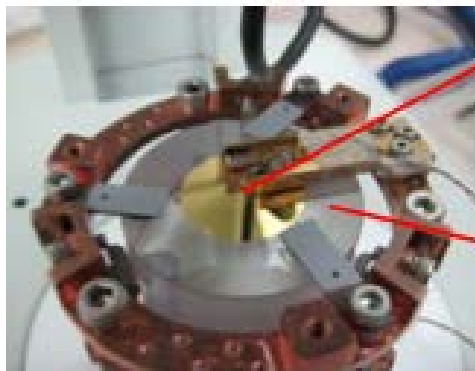
●  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \leq 0.09-0.15$  eV



※2011年終わりに測定開始し、今もPhase Iデータをとり続けている

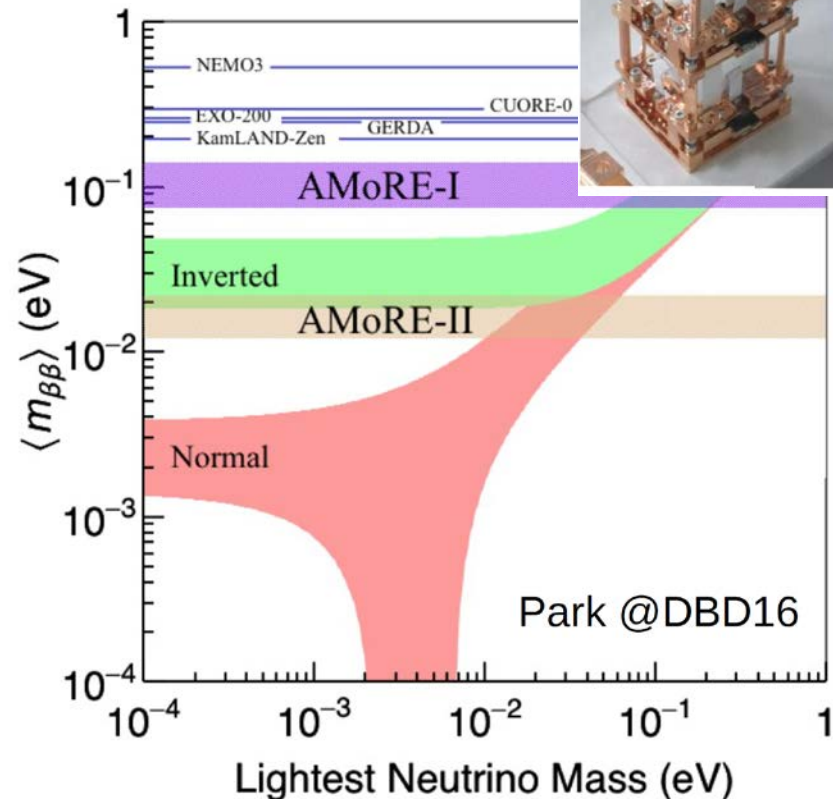
# AMoRE Advanced Mo based Rare process Experiment

- 場所: YangYang地下実験施設 (韓国, 地下700m)
- ターゲット:  $^{100}\text{Mo}$  (Q値 = 3034 keV, 9.63%)
- 検出器:  $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$  Scinti-Bolometer検出器
- MMC Phononセンサー: 高エネルギー分解能
- AMoRE-Polot 2016-2017
  - 1.5kg,  $T^{0\nu}_{1/2} > 3 \times 10^{24}$  year,  $m_{\beta\beta} < 300\sim 900$  meV
- AMoRE-I 2017-2019
  - 5kg,  $10^{-3}$  cts/(keV·kg·y), 70-140meV
- AMoRE-II 2020-2025@新実験室
  - 200kg, BG= $10^{-4}$  cts/(keV·kg·y)
  - 最終目標値:  $m_{\beta\beta} < 12\text{-}20$  meV  
( $T^{0\nu}_{1/2} > 1.1 \times 10^{27}$  year)



MMC Phonon sensor

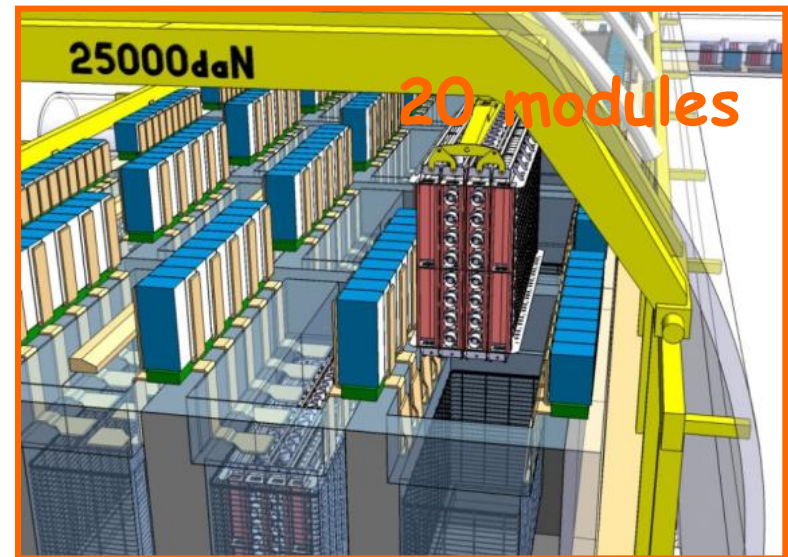
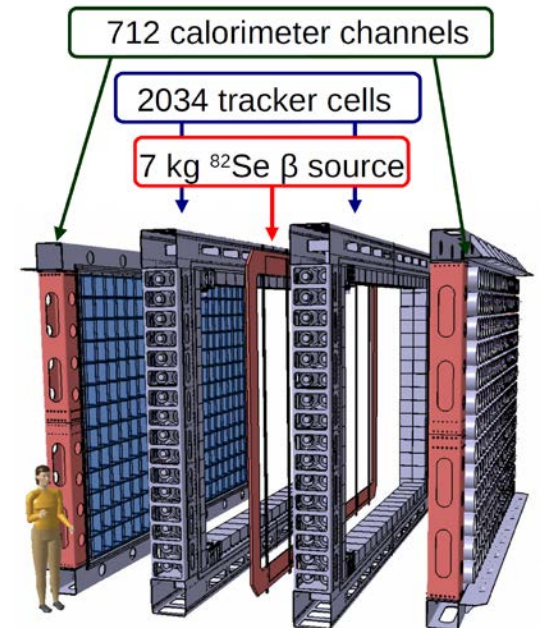
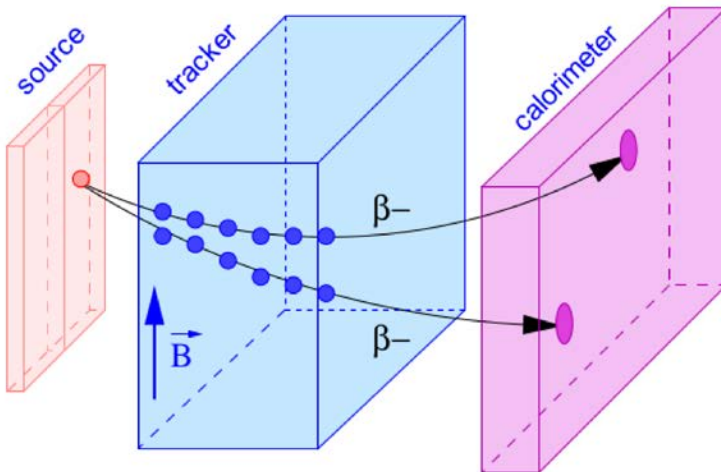
Ø4cm x 4cm crystal



# Super-NEMO実験

## Tacking detector

- Modane (フランス)
- $^{82}\text{Se}$ ,  $\sim 7\text{kg}/\text{module}$  (Total 100kg)
- First data expected for mid 2017
- • エネルギー分解能: 8% FWHM @1MeV
- Expected sensitivity  $10^{26}$  y,  
( $m_{\beta\beta} \sim 50 - 100$  meV)



# まとめ

---

- 世界中で測定、R&Dが進行中
- KamLAND-Zen実験の優位性
  - Phase2の結果： $1.0 \times 10^{26}$ yr, 60 meV
  - 現在測定を開始している実験(GERDA, CUORE)の3,5年後の到達感度
  - PANDAX-III, AMoRE(新興勢力)は、2000年~2022年頃に高感度観測開始を計画
  - CUPID, nEXOなどの次期計画は未定（2023年以降？）



# 日本での0νββ実験の将来

## ● KamLAND-Zen

- KamLAND-Zen800を実現（今年度） → ~ 40 meV
- 将来計画：KamLAND2-Zen
  - 感度 ~20meV
- いつ実現するか？ → 2020年、かな？

## ● CANDLES

- $^{48}\text{Ca}$ 濃縮 + Scinti-Bolometer技術開発で順階層領域の探索手法確立を目指す
- 濃縮ができなかったらどうするのか？ → 終わり、かな？

## ● AXEL, DCBA(MTD), ZICOS, ...

- 海外との競争を意識（NEXT, PANDAX-III), (Super-NEMO),